



Discrimination de modeles d'émission-gamma des pulsars par le spectrometre AMS-02

L. Girard

► To cite this version:

L. Girard. Discrimination de modeles d'émission-gamma des pulsars par le spectrometre AMS-02. Journees Jeunes Chercheurs 2002, Dec 2002, Aussois, France. pp.91-94. in2p3-00014172

HAL Id: in2p3-00014172

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00014172>

Submitted on 25 Nov 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Discrimination de modèles d'émission- γ des pulsars par le spectromètre AMS-02

Loïc GIRARD, loic.girard@lapp.in2p3.fr

Laboratoire d'Annecy-le-vieux de Physique des Particules (LAPP), Annecy

Résumé

Cet article présente dans une première partie le détecteur AMS-02 et les motivations de physique associées puis dans une seconde partie une simulation pour l'observation des pulsar- γ par AMS-02, en se basant sur un exemple qu'est le pulsar Vela.

1 Introduction

AMS-02 est un détecteur de physique des particules opérationnel sur la station spatiale internationale ISS, anciennement appelée station Alpha. Sa date de lancement est prévue en 2005 pour une mission appelée à durer 3 à 5 ans. AMS-02 s'inscrit dans le cadre de la collaboration internationale AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) où les détecteurs construits ont pour mission de collecter un grand nombre de rayons cosmiques (le mot rayon désigne des faisceaux de particules de matière) : ce fut déjà le cas d'AMS-01, détecteur embarqué sur la navette américaine Discovery en juillet 1998 dont la mission d'une semaine a permis de collecter 100 millions d'événements. Nous désignerons dans le reste de cet article AMS-02 sous le nom d'AMS.

2 La description d'AMS-02 et les buts de physique associés [1]

2.1 La technologie à l'oeuvre

AMS est un détecteur de physique des particules basé dans l'espace (fig. 1) : il emprunte des éléments propres à l'instrumentation de physique des particules - assemblage de sous-détecteurs permettant la redondance des mesures des caractéristiques des particules et l'identification de ces dernières (fig. 2) - en respectant des normes propres au domaine spatial - contraintes mécaniques et gestion du poids -. AMS mesure trois mètres pour une base d'un mètre et pèse quelques sept tonnes. Nous décrivons successivement les sous- détecteurs :

- Le TRD - Transition Radiation Detector - permet la séparation au sein du rayonnement cosmique de la composante hadronique (protons et noyaux) majoritaire d'un facteur 100 par rapport à la composante

leptonique (électrons). Le facteur de réjection p/e obtenu est de 10^3 jusqu'à 300 GeV. ¹

- L'aimant supraconducteur crée un champ magnétique de 0.8 Tesla : une particule chargée suit dès lors un rayon de courbure proportionnel à la quantité de mouvement divisée par la charge.
- Le tracker, noyé au sein du champ magnétique, est constitué de quatre pistes de silicium double face tapisées de pixels permettant d'une part, par la position des pixels touchés, la mesure du rayon de courbure et d'autre part, par l'énergie déposée dans ces mêmes pixels, la mesure de la charge de la particule.
- Les TOFs - Time Of Flight - situés au-dessus et en dessous de l'aimant supraconducteur sont des scintillateurs permettant une mesure du temps de vol des particules entre ces derniers à 120 ps près ; l'information donnée par ces TOFs est essentielle pour le système de déclenchement. Ils mesurent aussi la vitesse et l'énergie déposée par unité de longueur permettant le calcul du carré de la charge.
- Le RICH - Ring Imaging Cherenkov - est un détecteur Cherenkov permettant la déduction, à partir de la mesure de l'angle d'ouverture du cône de lumière émis par des particules "supraluminiques" ², de la vitesse de ces dernières. AMS, grâce à la mesure de l'impulsion par le tracker et de la vitesse par le RICH, caractérise une particule chargée puisque ces deux mesures permettent le calcul de la masse.
- Le calorimètre électromagnétique, d'une taille de 648x648x165 mm et d'un poids de 650 kgs, est un assemblage, de plus de 43000 fibres scintillantes noyées dans du plomb : il est destiné à mesurer l'énergie de particules électromagnétiques (électrons, positrons, et photons). Par exemple, lors de la traversée dans le calorimètre d'un électron, celui-ci se désintègre en deux photons, ces derniers se désintégrant en une paire e^+e^- , chacune de ces particules se désintégrant en deux photons, et ainsi de suite : une telle cascade de

¹On définit :

- d'une part ϵ_{ee} le nombre d'électrons identifiés en tant que tels sur le nombre initial d'électrons, et
- d'autre part ϵ_{ep} le nombre de protons identifiés en tant qu'électrons sur le nombre initial de protons.

Le facteur de réjection, souhaité le plus grand possible, est le rapport de ϵ_{ee} , souhaité le plus proche possible de 1, sur ϵ_{ep} , souhaité le plus proche possible de 0.

²L'adjectif supraluminique désigne une particule dont la vitesse v est supérieure à celle de la lumière dans le milieu considéré, c'est-à-dire c/n .

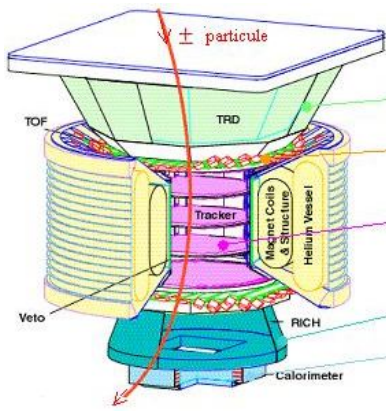


FIG. 1 – Le schéma du détecteur AMS-02.

300 GeV	e^-	e^+	p	\bar{He}
TRD				
TOF				
Tracker				
RICH				
Calorimeter				

FIG. 2 – La réponse d'AMS-02 à différentes particules.

particules est appelée une gerbe. Lors de la traversée des fibres scintillantes par les particules chargées de cette gerbe, de la lumière est émise, guidée le long de ces fibres, et collectée par 324 photomultiplicateurs. Afin d'établir une image tridimensionnelle de la gerbe développée, les fibres sont repartis sur 9 plans successivement croisés selon x ou y . Finalement, ce calorimètre, d'une taille de $16 X_0$ ³, permet la séparation entre leptons et hadrons avec un facteur de réjection de 10^4 jusqu'à 500 GeV et la mesure en énergie des particules électromagnétiques de 1 à 1000 GeV avec une résolution énergétique $\frac{\sigma}{E} = \frac{12\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$.⁴

2.2 Quels sont les buts de physique ?

AMS tentera d'apporter des éléments sur certaines questions posées à propos de l'Univers en étudiant les particules cosmiques.

– AMS détectera le rayonnement cosmique chargé jus-

³La longueur de radiation X_0 - distance moyenne sur laquelle un électron de haute énergie perd $1/e$ de son énergie initiale par rayonnement de freinage - est l'échelle de longueur appropriée pour la description de cascades électromagnétiques. Un calorimètre, possédant un grand nombre de X_0 , est adaptée à la mesure de particules électromagnétiques de haute énergie.

⁴La résolution énergétique, mesurant la dispersion de l'énergie reconstruite, est généralement approximée par la formule suivante $\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$ équivalente à $(\frac{\sigma}{E})^2 = (\frac{a}{\sqrt{E}})^2 + b^2$.

qu'à quelques centaines de GeV et pour des particules chargées tels que $A < 56$. Disposant d'une sensibilité et d'une statistique élevée, AMS, à titre d'exemple, en mesurant précisément le rapport Be^9/Be^{10} , permet la connaissance du temps de confinement dans la galaxie des particules chargées et la sélection de modèles de diffusion les plus à mêmes de décrire la réalité.

- AMS aura la capacité d'identifier des antinoyaux permettant de savoir s'il existe des régions d'antimatière dans un Univers, que nous savons aujourd'hui être localement constitué exclusivement de matière, tandis qu'à la naissance de ce dernier, la matière et l'antimatière s'équilibraient mutuellement. A ce jour, un noyau d'antihélium cosmique n'a pas été encore identifié; la limite actuelle est détenue par BESS dont la capacité est l'identification d'un tel antinoyau sur 10^7 noyaux d'hélium. AMS repoussera cette limite permettant ainsi, s'ils existent, l'identification d'un noyau d'antihélium parmi 10^9 noyaux d'hélium et d'un noyau d'anticarbone parmi 10^8 noyaux de carbone, cet antinoyau, ne pouvant être engendré qu'au sein d'une antiétoile, constituerait la preuve de l'existence de cette dernière.
- Les mesures combinées du rayonnement micro-onde à 3 K dans lequel baigne notre Univers et des vitesses de rotation des étoiles en fonction de leur éloignement du centre galactique pour diverses galaxies indiquent l'existence d'une matière, que nous ne voyons pas, appelée matière noire. Cette matière, représentant 98% de la matière totale, est constitué à son tour à 90% de matière non baryonique dite exotique; la particule la plus légère du modèle standard supersymétrique minimal (MSSM) de la physique des particules appelée neutralino est un candidat possible à cette matière noire. AMS pourra fournir une preuve indirecte des annihilations de neutralino en des paires particule-antiparticule, induisant un excès sur les spectres des particules et antiparticules; un tel signal du à une composante possible de la matière noire exotique se dégage toutefois mieux du fond, si l'observation est effectuée sur les spectres des composantes minoritaires du rayonnement cosmiques, c'est-à-dire ceux des antiparticules e^+ , p^+ , \bar{D} et des photons γ .
- AMS collectera des photons γ de haute énergie dans une gamme inexplorée, de 5 à 200 GeV, puisque le télescope spatial dédié- γ EGRET avait une limite supérieure vers 10 GeV et les télescopes au sol ont leur limite inférieure vers 100 GeV. AMS dispose de deux modes complémentaires pour mesurer le nombre de photons reçus [2] :
 - le mode "conversion en paire" : par interaction avec la matière du détecteur situé au-dessus du tracker, un photon a 20%⁵ de chances de se convertir en une paire e^+e^- détecté par le tracker,
 - le mode "photon unique" : si le photon ne s'est pas converti en une paire e^+e^- , ce qui a 80% de chances d'être le cas, il est alors détecté par le calorimètre.

⁵Le matériel au dessus du tracker représentant $0.22X_0$, la probabilité de conversion $P(d) = 1 - e^{-d/X_0}$ vaut alors 20%.

3 L'observation des pulsars- γ par AMS-02

3.1 Qu'est-ce qu'un pulsar- γ ?

Une étoile à neutrons est une étoile en fin de vie de quelques masses solaires et d'un rayon de 10 kms, où la gravitation n'est désormais non plus équilibrée par la pression d'un plasma mais par la pression de dégénérescence de neutrons. Si l'axe de rotation d'une telle étoile est non aligné avec l'axe du moment magnétique dipolaire, elle constitue un phare émettant un faisceau de photons, et si un tel faisceau vient à croiser la Terre, nous recevons, de ce qui est alors appelé un pulsar, des signaux électromagnétiques à intervalle extrêmement régulier de l'ordre de la milliseconde à quelques secondes, les pulsars les moins stables accusant un retard d'une trentaine de microsecondes par an. Nous nous intéressons ici aux pulsars γ émettant dans la partie la plus énergétique du spectre électromagnétique, dont six ont été détectés dans les années 90 par le satellite EGRET.

Deux modèles décrivant le mécanisme d'émission γ ont les faveurs des théoriciens :

- le modèle de la calotte polaire où les photons γ sont émis préférentiellement aux pôles,
- le modèle de la croûte externe où les photons γ sont émis préférentiellement à partir de certaines régions spécifiques de la magnétosphère.

Les deux modèles sont basés sur l'existence de champ électrostatiques accélérateurs permettant à des particules chargées d'accéder à une très haute énergie et de céder cette énergie soit par rayonnement de courbure ou encore par diffusion Compton inverse à un photon de plus basse énergie. Ces modèles peuvent être différenciés par la mesure de leurs spectre puisqu'un changement de pente est prédit vers la dizaine de GeV, plus ou moins accentué suivant le modèle. On dispose de spectres expérimentaux jusqu'à quelques GeV, or la discrimination des modèles ne se fait qu'au-delà d'une telle énergie [3]. Il est tentant de savoir si AMS, dont la bande d'énergie de travail couvre celle des photons issus de pulsars, peut disposer d'une statistique suffisante afin d'établir une discrimination entre les modèles d'émission- γ .

3.2 AMS-02 peut-il détecter des signaux de pulsars- γ ?

Nous disposons de spectres différentiels en $\text{GeV}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour établir un spectre de signal en nombre de photons : passer de $\text{GeV}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en nombre de photons signifie donc calculer une observabilité exprimée en $\text{cm}^2.\text{s}$. Or AMS, fixé sur la station internationale, ne voit pas pendant le même temps et avec la même surface de collection deux sources localisées à deux positions différentes sur la voûte céleste. A chaque position sur cette voûte est donc associée

une observabilité : une carte d'observabilité permettrait alors de connaître les sources les plus à même d'être observées par AMS. Puisque AMS dispose de deux modes pour la détection des photons γ , deux cartes sont calculées - l'une pour le tracker, la seconde pour le calorimètre - en tenant compte des probabilités de conversion ou non des photons [4]. Cette construction montre une observabilité du même ordre de grandeur sur les deux cartes (fig. 3 et 4). Quelque soit le mode de détection des photons, le pulsar Vela est situé sur une position très favorable, c'est-à-dire une position où est associée une grande observabilité et donc une grande chance de détecter des photons, puisque le nombre de photons de la source est le produit du spectre et de l'observabilité associées à cette source.

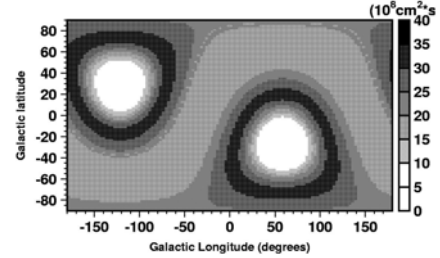


FIG. 3 – La carte d'observabilité du calorimètre.

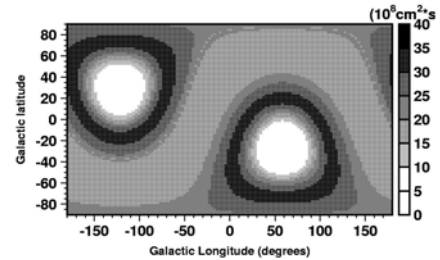


FIG. 4 – La carte d'observabilité du tracker.

Cependant tout signal est entaché d'un bruit : dans notre étude, le bruit est le fond diffus γ , d'origine galactique et extragalactique

- le premier cas, majoritaire par rapport au second dans un rapport de 10 sur 1, correspond aux protons rencontrant la poussière du milieu interstellaire, créant ainsi des π_0 qui se désintègrent en photons γ ,
- le second cas correspond aux photons γ provenant des noyaux actifs de galaxies autres que la notre.

Contrairement à une source ponctuelle associée à un spectre exprimé en $\text{GeV}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, le fond isotrope est associé à un spectre exprimé en $\text{GeV}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{str}^{-1}$: ainsi la résolution angulaire du détecteur considéré ⁶ joue ici un rôle primordial vis-à-vis du bruit de fond, alors qu'elle ne jouait aucun rôle vis-à-vis du signal de la source car seule l'observabilité,

⁶La résolution angulaire est la capacité à pouvoir pointer une source dans une boîte d'erreur donnée. Meilleure est cette résolution, plus petite est l'aire de cette boîte exprimée en stéradians.

définie par le produit de l'acceptance géométrique par le temps d'observation, a alors une importance. Sachant que la résolution angulaire typique de 0.017 str associée au calorimètre est plus grande que celle de 0.001 str associée au tracker, on s'attend à un fond plus important pour le calorimètre que pour le tracker, dans un rapport de 17 sur 1. Ainsi le pulsar- γ Vela, source intéressante par son observabilité, est entaché aussi d'un fond important puisque le nombre de photons du fond est le produit du spectre du fond, de la résolution angulaire du détecteur considéré et de l'observabilité de la source.

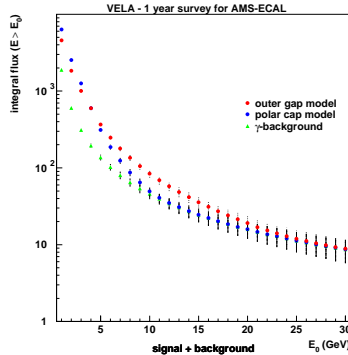


FIG. 5 – Le spectre de Vela mesuré par le calorimètre.

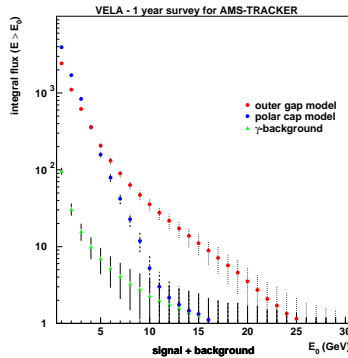


FIG. 6 – Le spectre de Vela mesuré par le tracker.

Les spectres ci-dessus (fig. 5 et 6) permettent de dresser deux points principaux dans notre estimation physique.

1. Le pulsar- γ Vela est une source de premier ordre puisque les deux modèles de mécanisme d'émission γ sont discriminables si le seuil d'AMS pour la sensibilité des photons est de 5 GeV (le seuil doit être choisi de façon à pouvoir, d'une part, faire des choses intéressantes pour la physique, et d'autre part, être réalisable avec les moyens technologiques mis en oeuvre : un seuil de 5 GeV satisfait ces deux conditions).
2. Le fond entachant le signal est
 - dans un cas, celui du tracker, bas : l'ensemble

{signal de la source+fond} se détache bien du fond et le signal de la source est estimable,

- dans un autre cas, celui du calorimètre, plus haut : il est donc intéressant de savoir si le fond γ isotrope reçu par le calorimètre peut être soustrait à l'ensemble {signal de la source+fond} afin d'estimer le signal de la source.

Afin de répondre à cette question, une simulation est effectuée en prenant en considération le bruit et le signal de la source. Sachant que d'une part, le signal est concentré dans un cône de 1 à 1.5 degrés autour de l'axe de la source, et que d'autre part, le fond est mesurable directement en élargissant la base du cône jusqu'à une dizaine de degrés ; le fond gamma venant du continuum peut donc être mesuré afin d'améliorer la sensibilité du détecteur vis-à-vis de la source. Une telle simulation apporte une réponse positive : il est donc possible de soustraire le fond γ reçu par le calorimètre à l'ensemble {signal de la source+fond} afin d'estimer le signal de la source dans le mode calorimètre. Ainsi avec le tracker et le calorimètre, AMS est capable vis-à-vis du pulsar Vela de discriminer les modèles d'émission- γ (fig. 7).

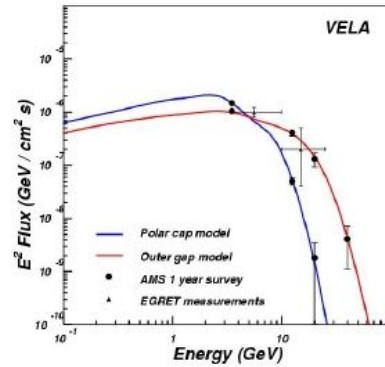


FIG. 7 – AMS discrimine les modèles d'émission- γ [2].

Remerciements

Je remercie les coordinateurs et orateurs des différentes sessions pour avoir rendu possible le panorama de la physique moderne présenté pendant les JJC 2002.

Références

- [1] <http://ams.cern.ch/>
- [2] Gamma-Ray Detection with the AMS, Giovanni Lamanna, ams.cern.ch/AMS/Analysis/gammapos/elba-lamanna.pdf
- [3] Gamma-Ray Pulsars : Models and Predictions, Alice K. Harding, astro-ph/0012268
- [4] Rapport de stage : acceptance du détecteur AMS en rayons gamma, Aurélien Crida, Bibliothèque du Lapp, www.lapp.in2p3.fr